

【第 27 話】低雑音増幅器 (LNA) のインピーダンスマッチング (その 2・NF と SN 比)

濱田 倫一

第 26 話では、高周波アナログ回路における雑音の定義について解説し、雑音指数 (NF) の概念についてご紹介しました。無線通信機の回路設計においては雑音の大きさは SNR (SN 比) で取り扱いますが、回路で観測される雑音が全て SNR の劣化につながるかというと、必ずしもそうではありません。第 27 話では NF の縦続接続と SN 比について、少し詳しく触れることにします。ということで、今月も Mr. Smith やインピーダンスマッ

■ 1. NF=5dB の内訳

第 26 話でトランジスタが自ら発生する雑音の大きさは NF (雑音指数) という諸元を用いて表現するとご説明しました。NF は入出力の SN 比の比で、図 1 に示すような関係にあるときに、NF=5dB であると解説しました。

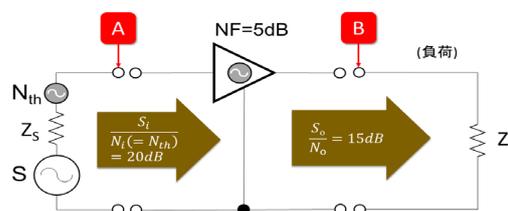


図 1 NF の定義 (第 26 話の図 5 の再掲)

もう少し詳しく見てみましょう。図 1 に S,N それぞれのレベル変化を追記したものを図 2 に示します。図 2 では増幅器の性能を利得 (G1)=30dB(1000 倍)、NF=5dB と定義しました。また雑音電力を取り扱うので電力値の変化が判りやすくなるように信号帯域幅を 10kHz と規定しました。Bw=10kHz の時の熱雑音 Nth の大きさは第

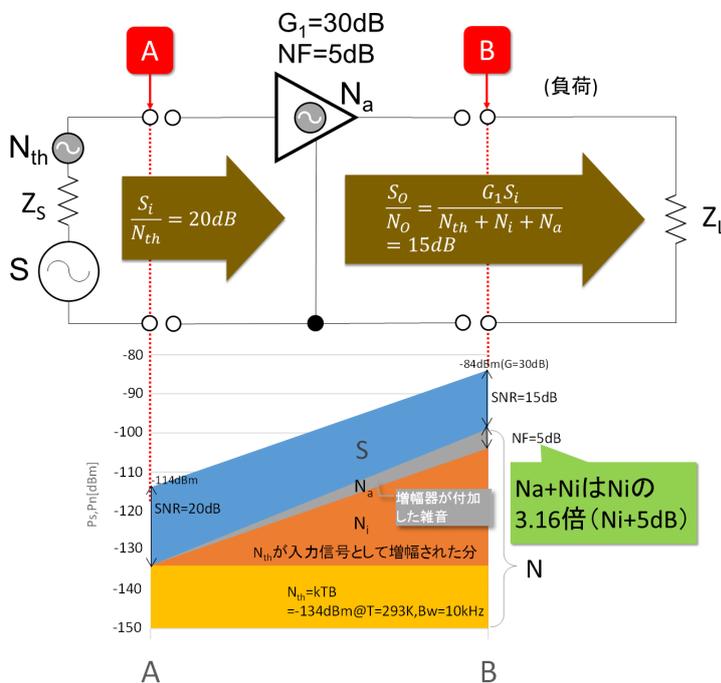


図 2 雑音電力の内訳

図 2 において入力端子 (A 点) SN 比を決定しているのは Nth すなわち熱雑音だけです。Nth は増幅器を構成するトランジスタが信号 Si をベース電流として感知する際、同時に観測される雑音電力です。本図では入力の SNR を 20dB としましたので、信号電力 Si の大きさは Nth の 100 倍 (+20dB) すなわち $-134+20=-114$ [dBm] となります。

見方を変えると、図2の増幅器には S_i+N_{th} という2つの信号の和が入力されていると考える事ができます。そして出力端子(B点)には、これらが1000倍(G_1 倍 = +30dB)に増幅されて $1000 \times S_i+N_i$ として出力されることになります。(式1-1)

$$\text{出力電力のうち入力信号を増幅して出力される成分：} P_{FWD}=G_1 (S+N_{th})=G_1 S+N_i \quad (\text{式 1-1})$$

この時、第26話で解説したとおりトランジスタ自身がショット雑音を主成分とする雑音を発生するため、出力端子においては(式1-1)にさらにトランジスタ自身が発生する雑音電力 N_a が加算されます。この結果増幅器出力端子(B点)の総電力(信号電力 S_O と雑音電力 N_O の和)は(式1-2)で示されます。

$$\text{増幅器の総出力電力：} P_O=P_{FWD}+N_a \quad [G_1] \quad S+N_i+N_a \\ =S_O+N_O \quad (\text{式 1-2})$$

この時、増幅器が付加する雑音 N_a の大きさは雑音指数 NF で表現されることになっていました。その意味合いは図2に示した通り、 N_i+N_a が N_i の NF 倍になるので、出力雑音電力 N_O は

$$N_O=N_i+N_a=NF \cdot N_i=NF \cdot G_1 N_{th} \quad (\text{式 1-3})$$

となります。

実際には、この総出力電力を出力端子で観測しようとすると、さらに N_{th} が一緒に観測されてしまいますので、図2に示す通り実際に観測される $N_O(OBS)$ は

$$N_O(OBS)=NF \cdot G_1 N_{th}+N_{th}=N_{th} (NF \cdot G_1+1) \quad (\text{式 1-4})$$

となります。

■ 2. この増幅器を2段接続するとどうなるか？

増幅器(トランジスタ)の出力雑音の内訳についてご理解頂けましたでしょうか。次にこの増幅器を2段接続した場合の雑音を考えてみましょう。増幅器の $NF=5\text{dB}$ でしたから、1段あたりの SNR 劣化は 5dB 、2段接続すると 10dB の劣化となるので、図2に示したように入力信号の SNR が 20dB の場合は4段増幅すると信号が雑音に埋もれてしまう事になります。さあ大変!...と考えた方は結構おられるのでは無いでしょうか？

結論から申し上げますと「 $NF=5\text{dB}$ の増幅器1段あたり SNR が 5dB ずつ劣化する」という解釈は間違いです。 NF の定義を単純に「入力の SNR と出力の SNR の比」と理解してしまうと、このような誤解をしてしまいます。 NF の定義の正しい理解は「入力 SNR と出力 SNR の比 但し入力 SNR とは、入力信号(S)と入力熱雑音(N)の比、出力 SNR とは入力信号と相似の信号電力(S)とそれ以外の電力成分(N)の比」です。

1章で扱った増幅器を2段接続したときの信号電力と雑音電力の変化を示した図3で詳しく解説します。

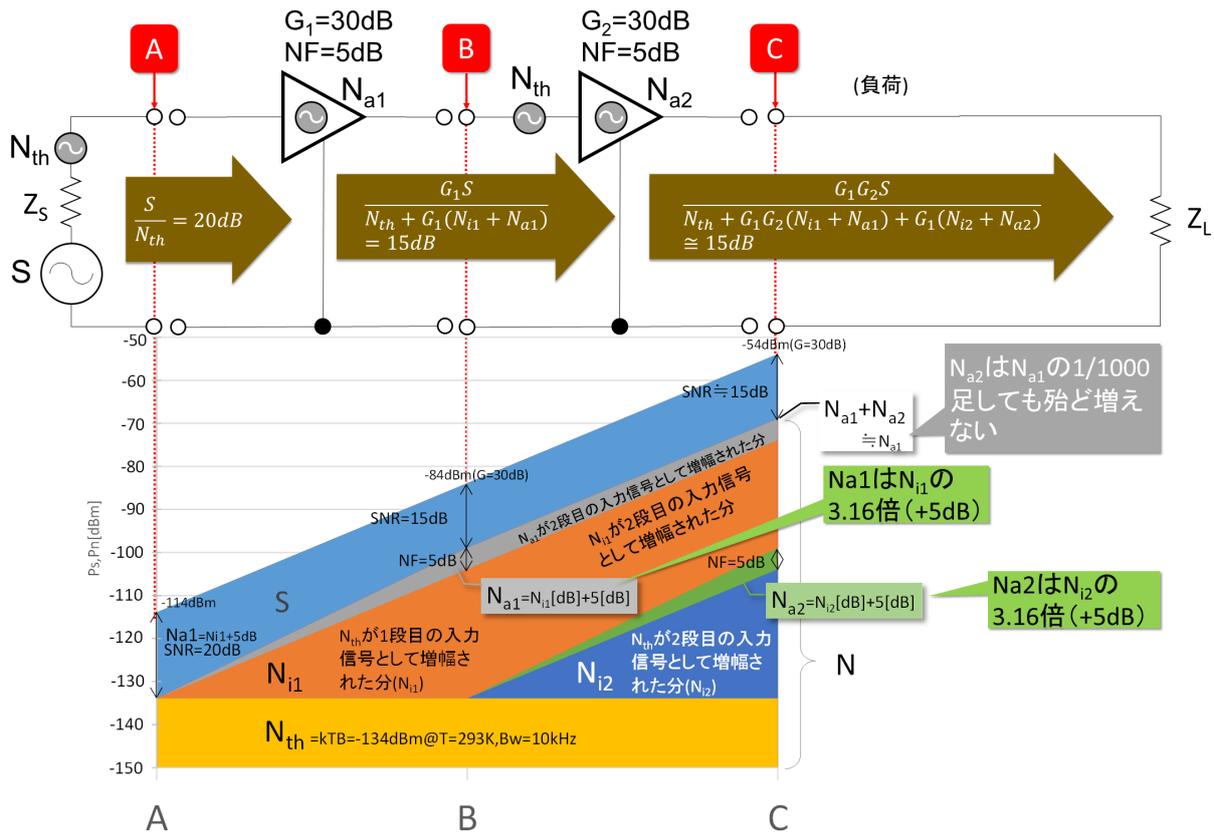


図3 2段接続したときの雑音電力の変化

図3では、増幅器が2段になるので1段目(A-B間)の利得をG1、2段目(B-C)をG2、1段目が増幅した熱雑音電力をNi1、2段目が増幅した熱雑音電力をNi2、1段目が付加した雑音電力をNa1、2段目が付加した雑音電力をNa2と表記しています。

本図において、端子Aから端子Bまでは、上記記号の違いを除いて図2と同じです。1段目の出力(端子B)には、1段目が1000倍(+30dB)に増幅された信号Sと1000倍に増幅された熱雑音の3.16倍(+5dB)すなわち、入力熱雑音の3160倍の雑音電力が出力されています。

これを2段目の増幅器で増幅するのですが、2段目の増幅器にとって1段目の出力電力を信号と雑音に区別することは不可能であり増幅器にとっては全て「信号」です。2段目の増幅器は1段目と同様、入力熱雑音の3160倍の雑音電力(Na2)を新たに出力電力に加算しますが、この2段目で加算される雑音電力は1段目が出した雑音電力(2段目にとっては信号だが我々にとっては雑音)は、2段目で1000倍に増幅されて2段目の出力に現れるので、雑音電力全体の増加分は+0.1%、すなわち1.001倍にしかなりません。つまり2段目の増幅器のNFは1段目の増幅器の利得分の1しか寄与しないのです。n段増幅器の総合NFの値は個々の段のNFの積(dB値の場合は和)にはならず、(式2-1)に示す形になります。この計算式はアマチュア無線の教科書にも良く登場するNFのカスケード接続式ですね。

$$NF_{TOTAL} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{NF_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

但し、NF,Gの値は全て真数。(式2-1)

■ 3. アッテネータの NF は 1/ 減衰量？

LNA の設計とは直接関係ないのですが、折角 NF のお話をさせて頂いたので、話のついでに少し余談です。受信アンテナから受信機までの損失が大きいと受信感度が劣化するというのは、アマチュア無線をやっている方なら経験的に理解されている事と思います。

これは熱雑音電力 N_{th} の大きさは何処で観測しても同じ大きさ $kTB[W]$ になる事に起因しています。すなわち図 4 に示す通り、信号が減衰した分だけ SNR が劣化していくので、例えば減衰量 5dB のアッテネータ (利得 -5dB) なら NF の定義 (入力 SNR と出力 SNR の比) から $NF=5dB$ に相当する為です。

受信機入力など前段に増幅器が存在しない場合はアッテネータの減衰量 = アッテネータの NF と取り扱って問題ありません。実際に受信機の劣化配分設計を行う際は、そのように取り扱います。例えば $NF=1dB$ の低雑音増幅器の直前に 5dB のアッテネータが挿入されていると、アッテネータから低雑音増幅器出力までのトータル NF は 6dB となります。

但しアッテネータはトランジスタのように自身で熱雑音以外のノイズを付加しないので、図 5 に示すようなケースにおいて、増幅器の出力側に挿入されるアッテネータにこの考えを適用して、 $NF=5dB$ 、 $G=-5dB$ という値で (式 2-1) に代入したりすると、おかしな計算結果になってしまいます。

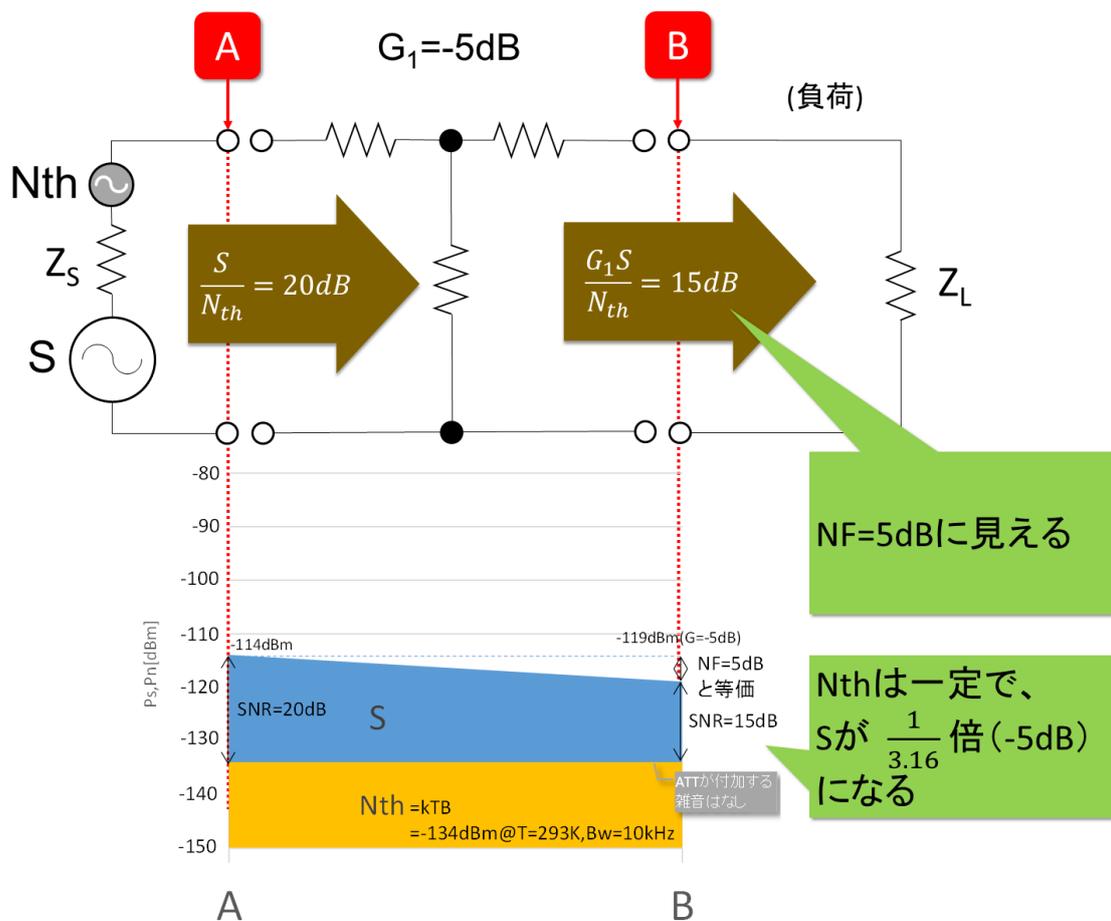


図 4 アッテネータの NF

$G=-5dB$ という値で (式 2-1) に代入したりすると、おかしな計算結果になってしまいます。

図5のようなケースにおいては、端子A～端子Cまでを利得25dB、NF=10dBの増幅器として取り扱い、その後ろ(端子C～端子D)に5dBの減衰器が接続されていると考える、またはNF=10dB、利得20dBの1個の増幅器として取り扱います。

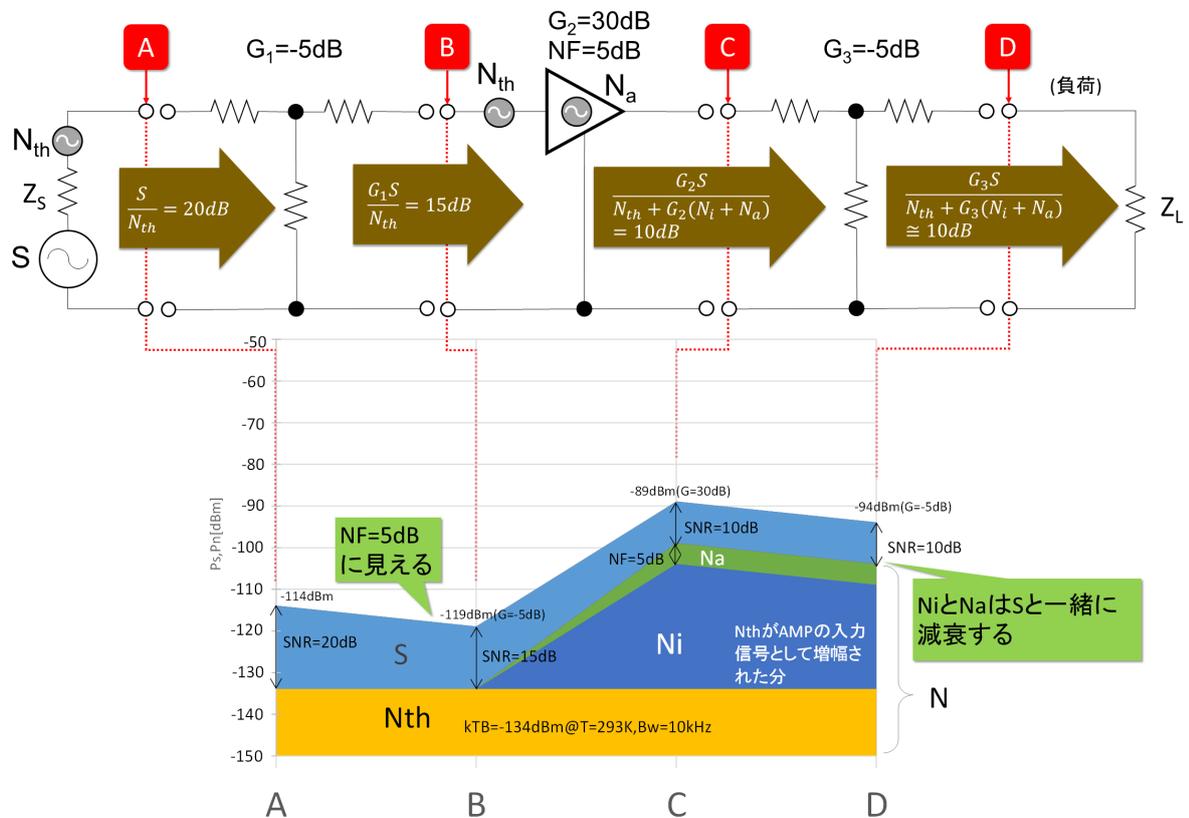


図5 アッテネータの増幅器の縦続接続

■ 4. 第27話のまとめ

第27話では第26話に引き続き、雑音指数 (NF) について詳しく解説しました。話を本題に戻すと、低雑音増幅器 (LNA) とは、増幅器自身が発生する雑音のレベルが小さい増幅器、すなわち NF の大きさが小さい増幅器の事です。実はトランジスタ増幅器の NF の大きさは、入力整合回路の設計によって変化します。このため LNA を設計する際はトランジスタの入力回路は特殊なインピーダンスマッチングを行います。今回はこのあたりを中心に話をさせていただきます。以下、第27話でお伝えした内容を整理しておきます。

- (1) NF とは増幅器の出す全雑音電力 (熱雑音 + 内部雑音) が、その増幅器の入力端子において、熱雑音の何倍に相当するかを示した数値である。
- (2) NF は入力端子で観測される熱雑音電力の大きさを基準電力として定義されていて、トランジスタで増幅された熱雑音電力と混同しないようにする必要がある。
- (3) 増幅器をカスケード (縦続) 接続する場合、2 段階以降の NF は前段までの利得分の 1 の大きさに見える
- (4) アッテネータに NF を定義できるのは初段増幅器よりも前に存在するもののみである。段間のアッテネータは前段増幅器の利得を減算する取り扱いとするのが妥当である。

今回は NF と信号源インピーダンスの関係についてご説明します。